

Welche Informationen liefert Strahlung?

Methoden der Astronomie für Nicht-Physiker

Björn Malte Schäfer & Markus Pössel

Astronomisches Rechen-Institut/Haus der Astronomie

20.10.2016 – 26.1.2017

Strahlung und ihr Informationsgehalt

Was sagt uns Strahlung über die Quellen, die sie erzeugen?

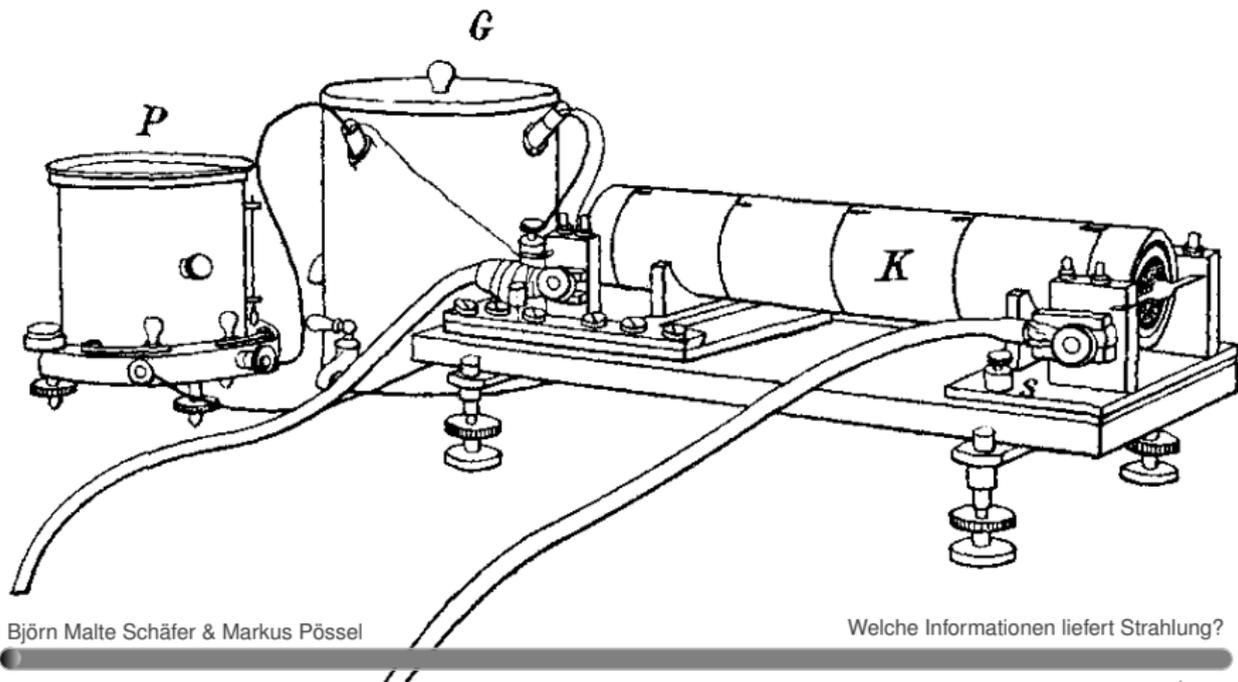
Drei hauptsächliche Konzepte:

- Wärmestrahlung (Wdh.)
- Synchrotronstrahlung
- Spektrallinien

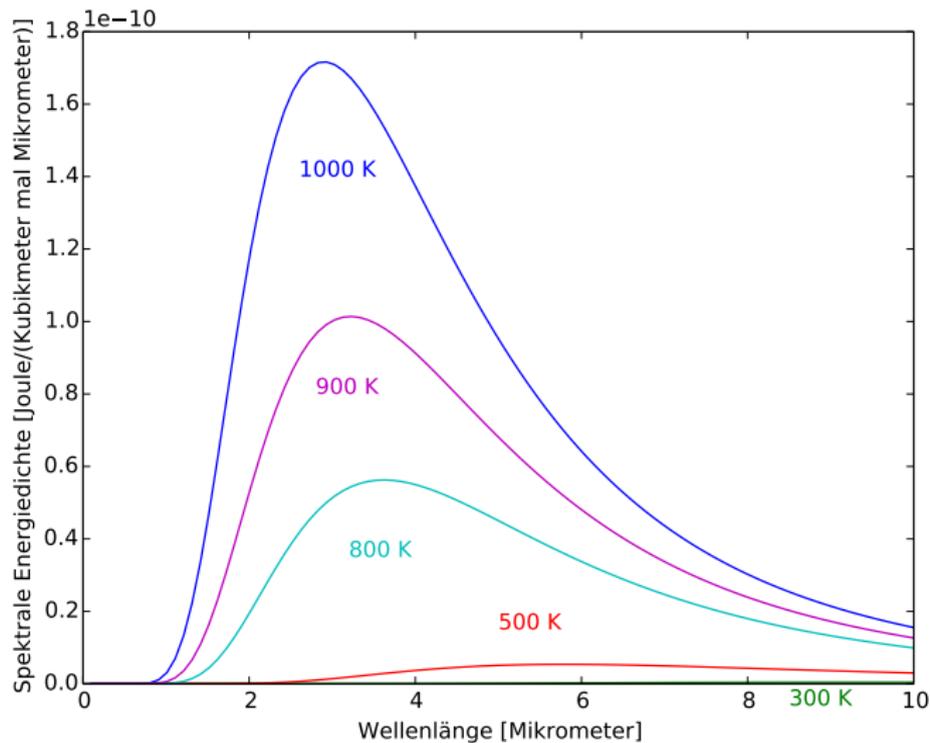
Allgemeine Eigenschaften: Strahlungstransport (wieviel von einem dreidimensionalen Objekt sieht man?)

Schwarzkörper-Spektrum: Messungen

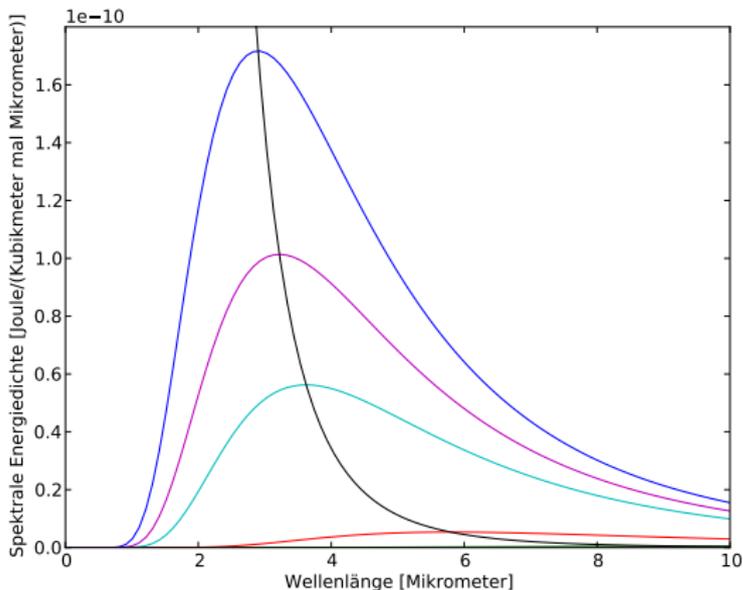
Otto Lummer und Friedrich Kurlbaum 1895+,
Physikalisch-Technische Reichsanstalt:



Planck-Spektrum

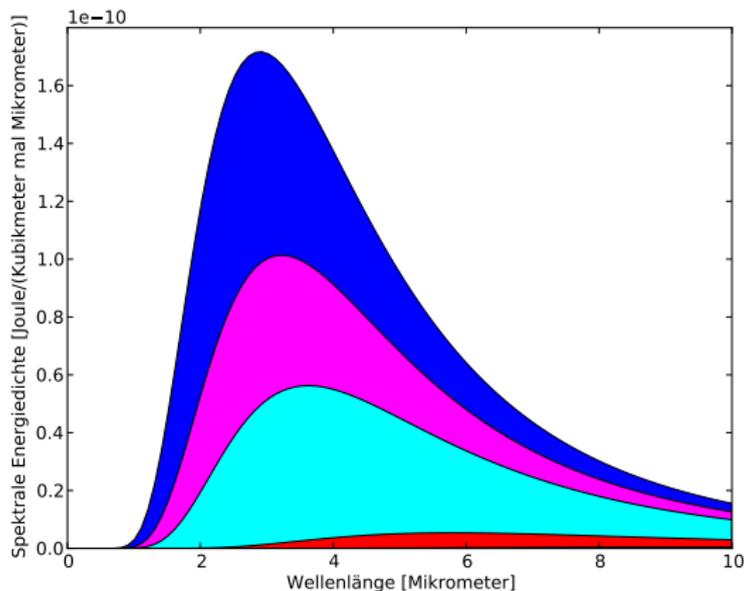


Planck-Spektrum



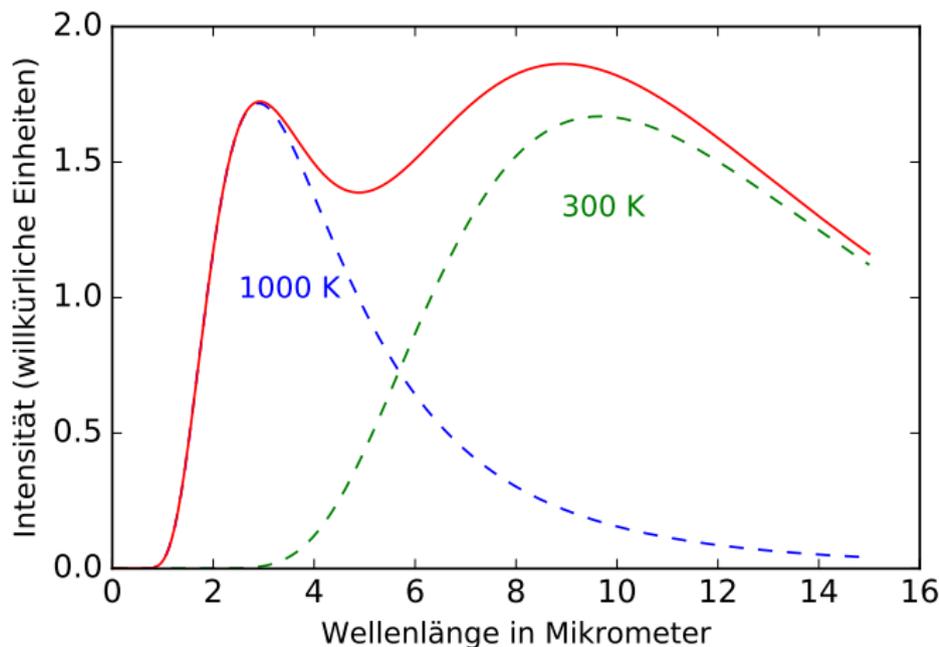
Maximum der Energieverteilung : $\lambda_{max} = 2897,8 \mu\text{m} \cdot \frac{1 \text{ K}}{T}$

Planck-Spektrum

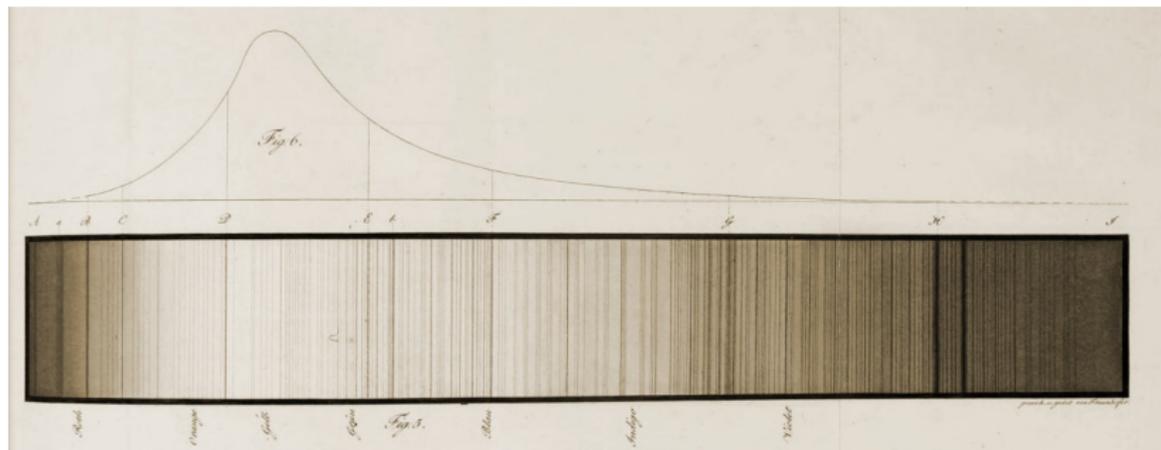


Gesamt-Energiedichte (Stefan-Boltzmann-Gesetz): $e = \frac{4\sigma}{c} T^4$.

Komplexere Modelle: Summe von Planck-Spektren



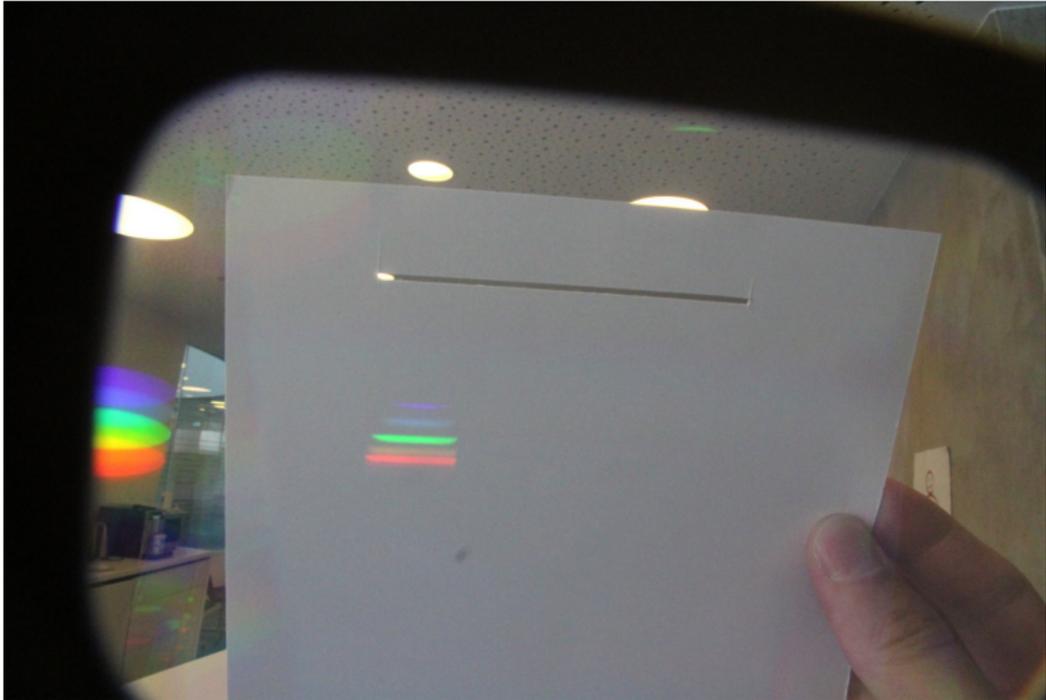
Fraunhofer-Linien



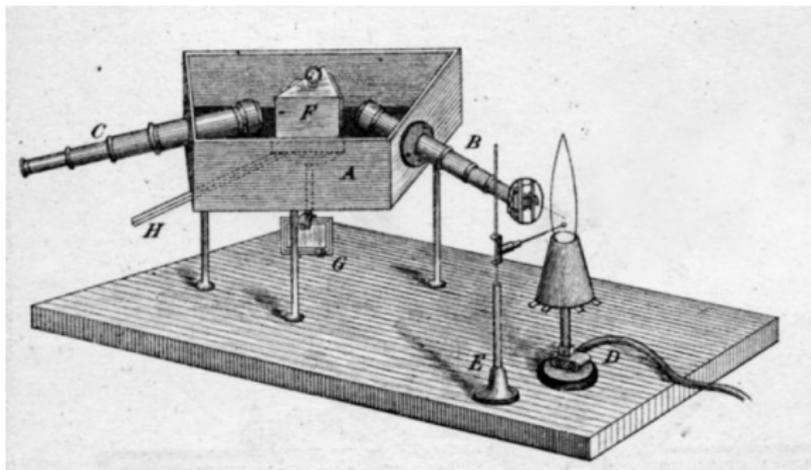
Joseph von Fraunhofer: "Bestimmungen des Brechungs- und Farbenzerstreuungs-Vermögens verschiedener Glasarten, in Bezug auf die Vervollkommnung achromatischer Fernröhre" in Denkschriften der Königlichen Academie der Wissenschaften für die Jahre 1814 und 1815, Bd. V. München 1817. Classe der Mathematik und Naturwissenschaften, S. 193–226. Hier: Tafel II

Joseph von Fraunhofer: Entdeckung dunkler Linien im Sonnenspektrum
 — genutzt für Messung der Brechungseigenschaften, bessere
 achromatische Fernrohre

Erinnerung: Solche Spektren sind Spaltbilder!



Spektroskopie in der Chemie



Kirchhoff und Bunsen: „Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen“ in *Annalen der Physik und Chemie*, Bd. 110 No. 6, 1860, S. 161-189. Neu herausgegeben von Gabriele Dörflinger, Universitätsbibliothek Heidelberg

Gustav Kirchhoff (1824–1887), Robert Bunsen (1811–1899):
systematische Zuordnung von *hellen* Spektrallinien zu chemischen
Elementen für Natrium, Lithium und Kalium – unabh. von Temperatur
oder Erhitzungsart; später neu entdeckt Cäsium und Rubidium

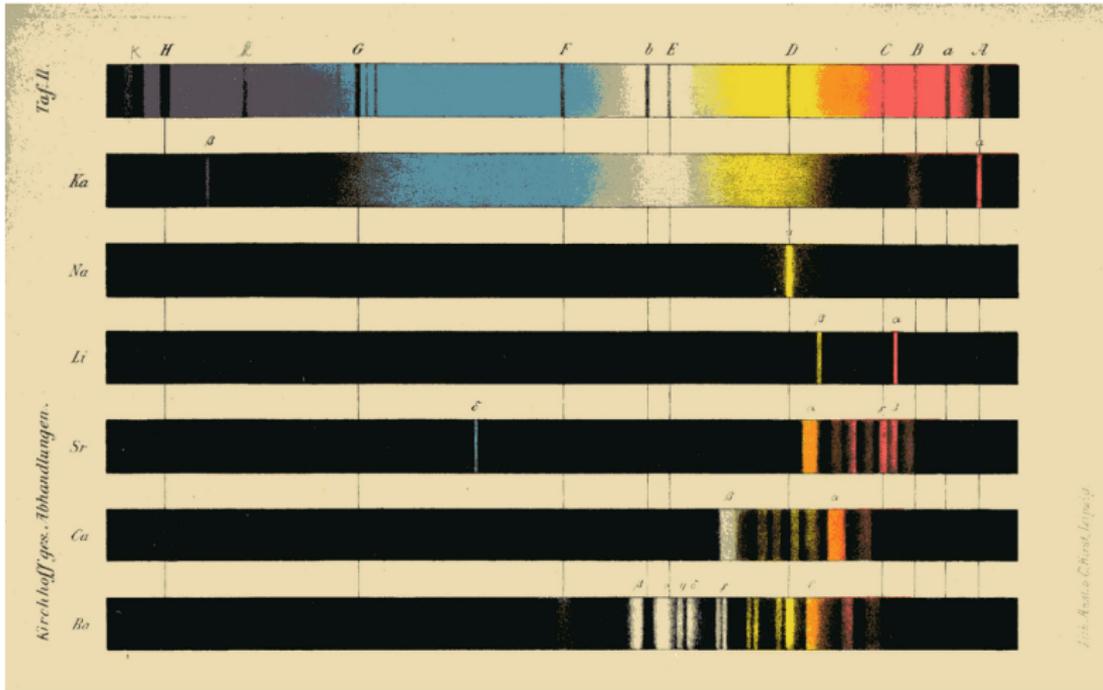
Spektroskopie → Astrochemie

Kirchhoff Strahlungsgesetze: Gute Absorber (bei gegebener Wellenlänge) sind auch gute Emmitter (bei jener Wellenlänge)

Kirchhoff und Bunsen vergleichen chemische Dämpfe / Flammen mit Sonnenlicht (Experimente im Haus zum Riesen) und Drummond'schem Licht: Fraunhofers dunkle Linien entsprechen identifizierbaren chemischen Elementen!

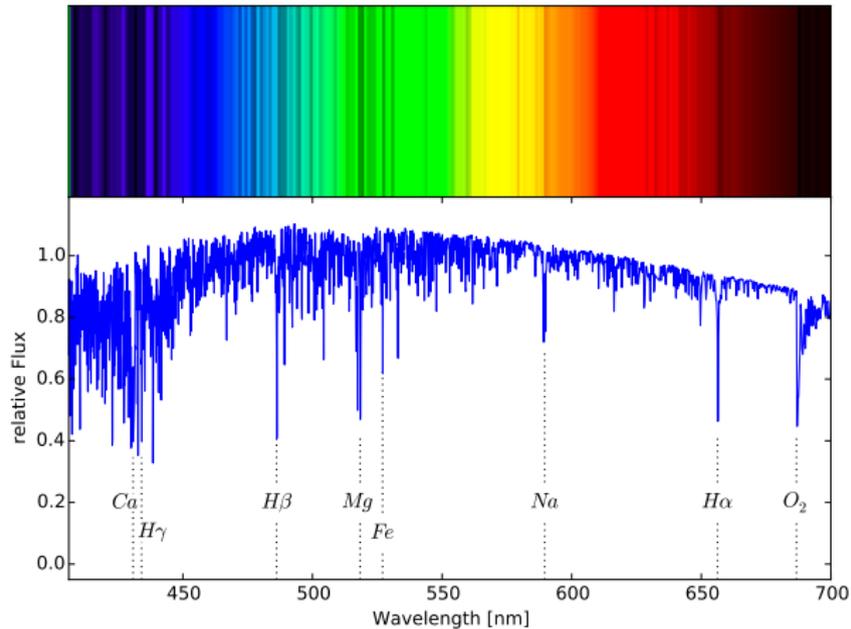


Vergleich Sonne – Gasflammen



Kirchhoff und Bunsen: „Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen“ in Annalen der Physik und Chemie, Bd. 110
 No. 6, 1860, S. 161-189. Neu herausgegeben von Gabriele Dörflinger, Universitätsbibliothek Heidelberg

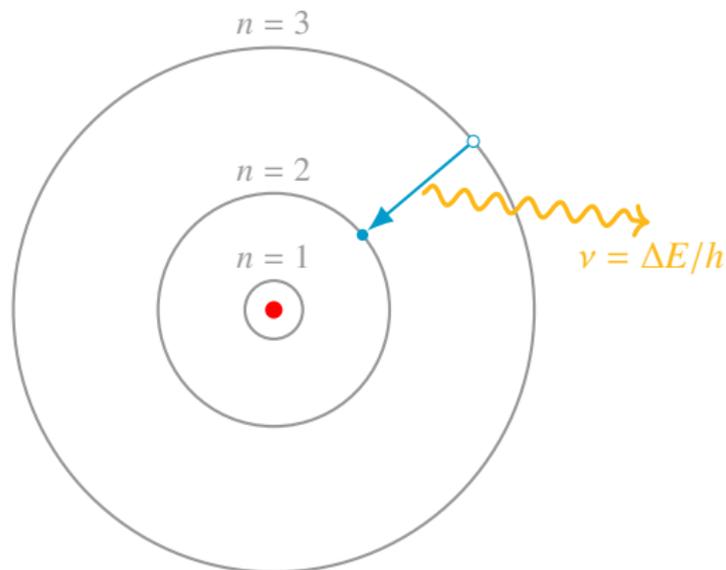
Modell: Atome und Spektrallinien



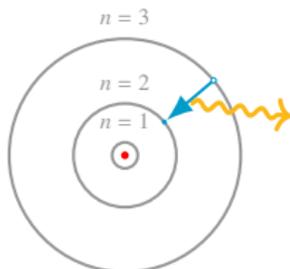
Sonnenspektrum. Daten nach Reiners et al. 2016

Woher Linien? Bohr'sches Atommodell

Elektronen können rund um den Atomkern nur auf bestimmten Bahnen „umlaufen“, jede davon mit genau definierter Elektronenenergie. Bei Übergängen von einer Bahn zur anderen werden Photonen ausgesandt:



Bohr'sches Atommodell



Energieniveaus: Übergangsenergie ΔE hängt von Schalenzahlen n, m ab wie

$$h\nu = \Delta E \sim \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Spektralserien, z.B. Lyman-Serie, Balmer-Serie, Paschen-Serie...

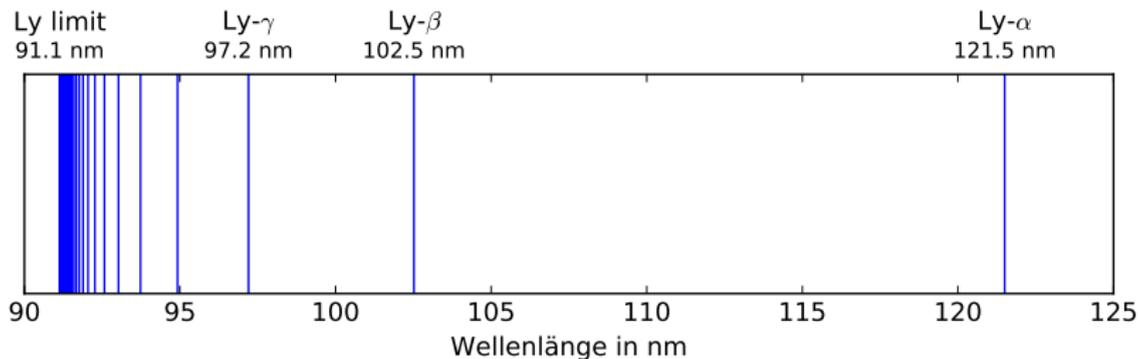
Typische Energien: UV und sichtbares Licht

Spektralserien

Spektralserien für jeweils festes m :

$$h\nu = \Delta E \sim \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Wasserstoffatom, $m = 1$: Lyman-Serie



Charakteristische **Muster** erlauben Identifikation!

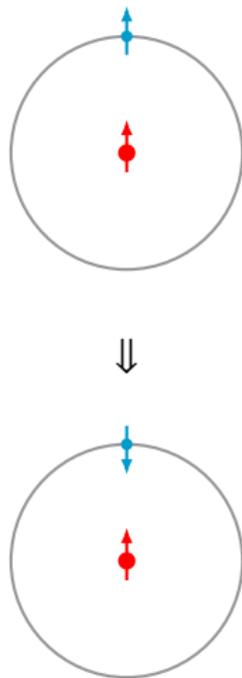
Spektrallinien: Spin-Kopplungen

Elektronen und Atomkerne agieren als winzige Magnete.

Parallele Magneten: Energiereicherer Zustand als antiparallel.

Spaltet Linien in Dubletts, Triplets, andere Multipletts

Umklappen parallel-antiparallel für atomaren Wasserstoff H: $\lambda = 21 \text{ cm}$



Molekulare Spektrallinien: Moleküle vibrieren

4.1 μm

7.3 μm

15.6 μm

15.6 μm

Typischer Energiebereich:
Wellenlängen $1 - 10^2 \mu\text{m}$

mittleres und Ferninfrarot \Rightarrow
Weltraumteleskope oder SOFIA



Bild: ESA

Welche Informationen liefert Strahlung?

Molekulare Spektrallinien: Moleküle rotieren

$$J = 1$$

$$J = 2$$

$$J = 3$$

$$J = 4$$

Typischer Energiebereich:
Millimeter-, Zentimeterwellen und
mehr

Millimeter- und andere
Radioteleskope, rechts: APEX



Bild: ESO/Felipe MacAuliffe

Molekulare Spektrallinien: Moleküle rotieren

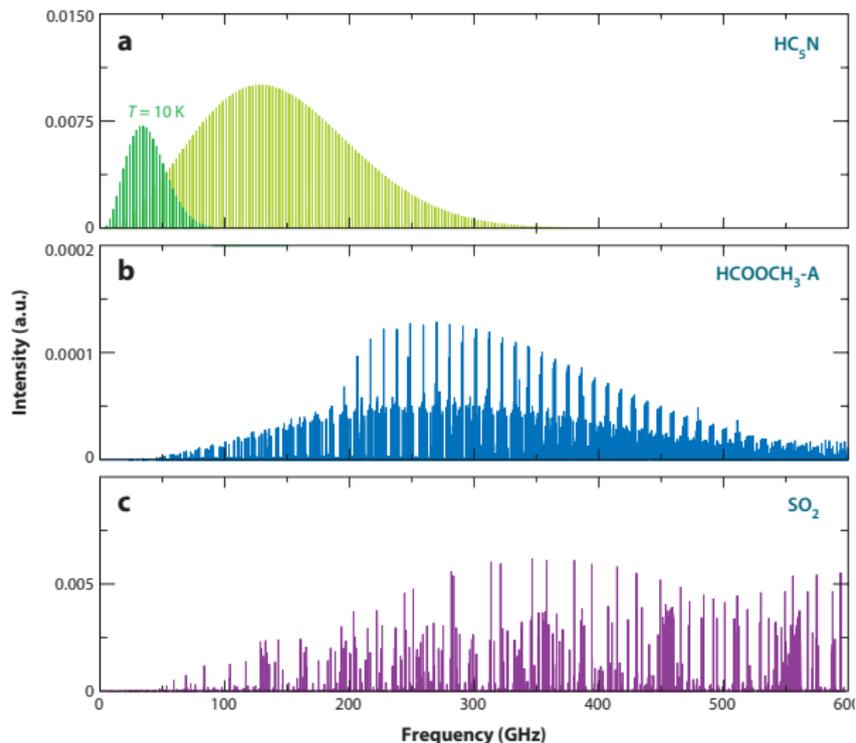
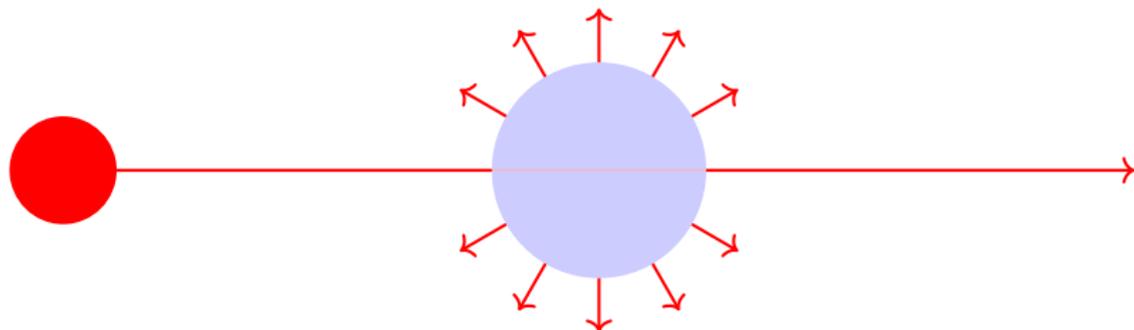


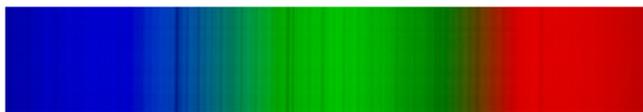
Bild: Fig. 2 in Herbst / van Dishoeck 2009, Annual Reviews in Astronomy 47,427–480

Absorptionslinien

Heiße Strahlungsquelle im Hintergrund, kühleres Gas im Vordergrund:



Streuung \Rightarrow nur abgeschwächtes Licht kommt bei den entsprechenden Frequenzen an:



Beispiel: Sonne

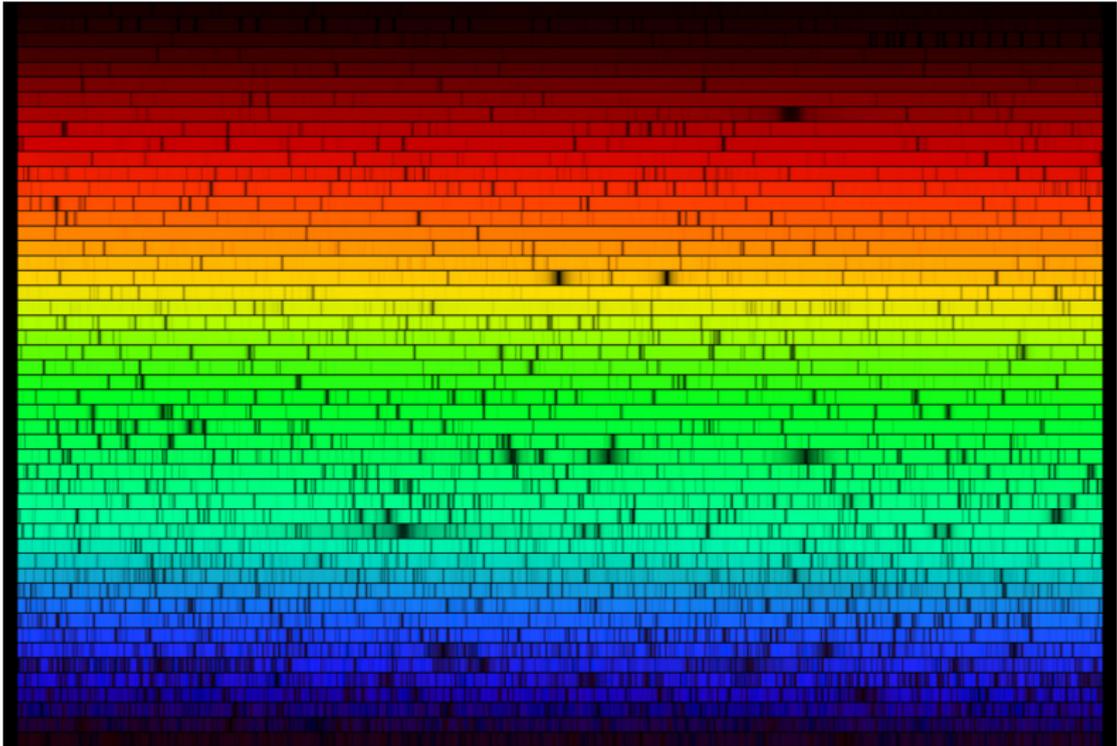


Bild: N.A.Sharp, NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF (permission for educational use)

Björn Malte Schäfer & Markus Pössel

Welche Informationen liefert Strahlung?

Beispiel: Sonne

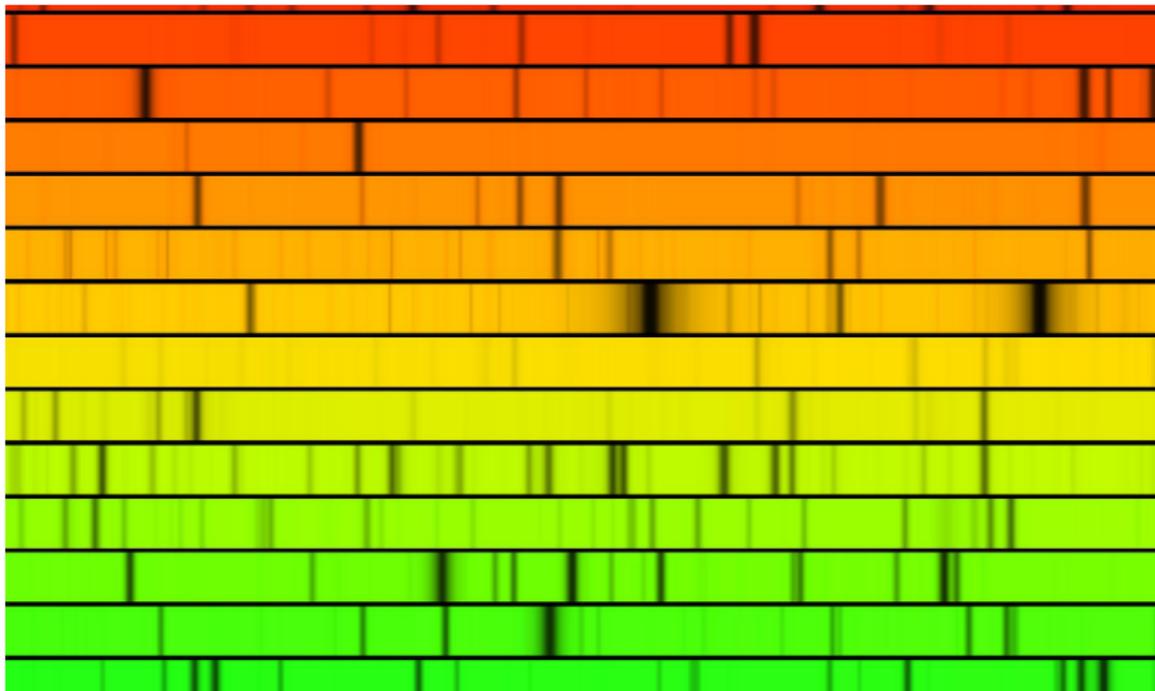
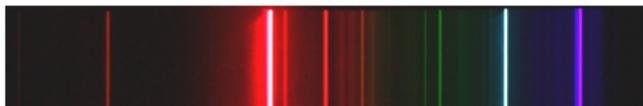
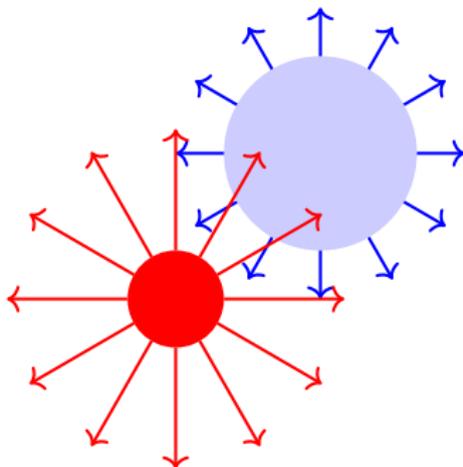


Bild: N.A.Sharp, NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF (permission for educational use)

Emissionslinien

Anregung zum Strahlen durch energiereiche Photonen einer anderen Quelle (z.B. heißer Stern), alternativ: Temperatur (innere Energie) in geeignetem Bereich:



Spektralserien

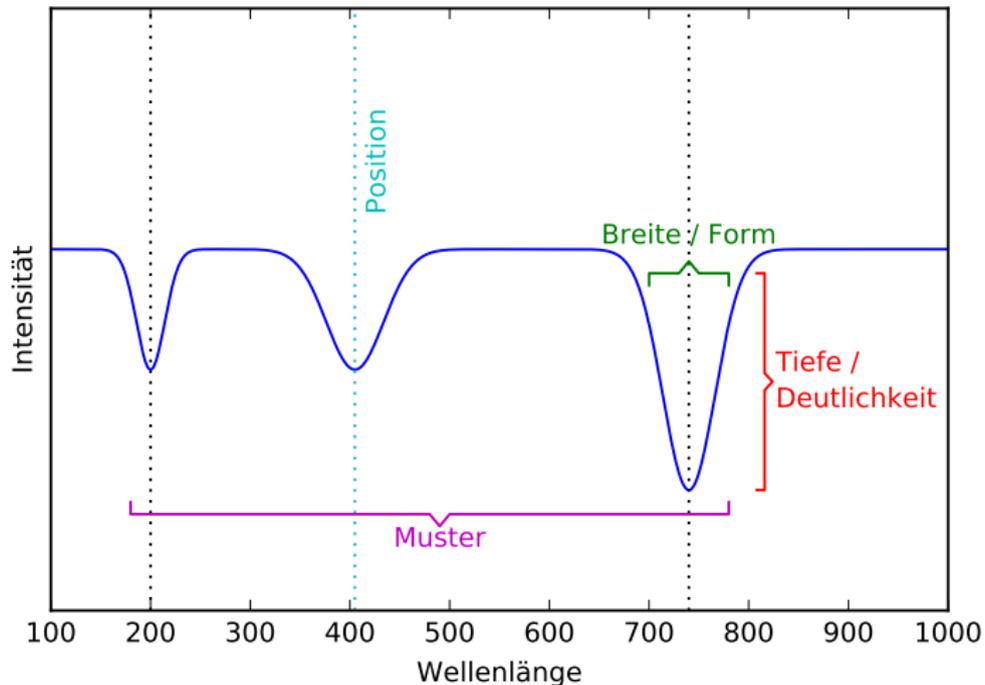
Übergänge zu $m = 2$: Balmer-Serie ($H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$, ...)

$$h\nu = \Delta E \sim \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

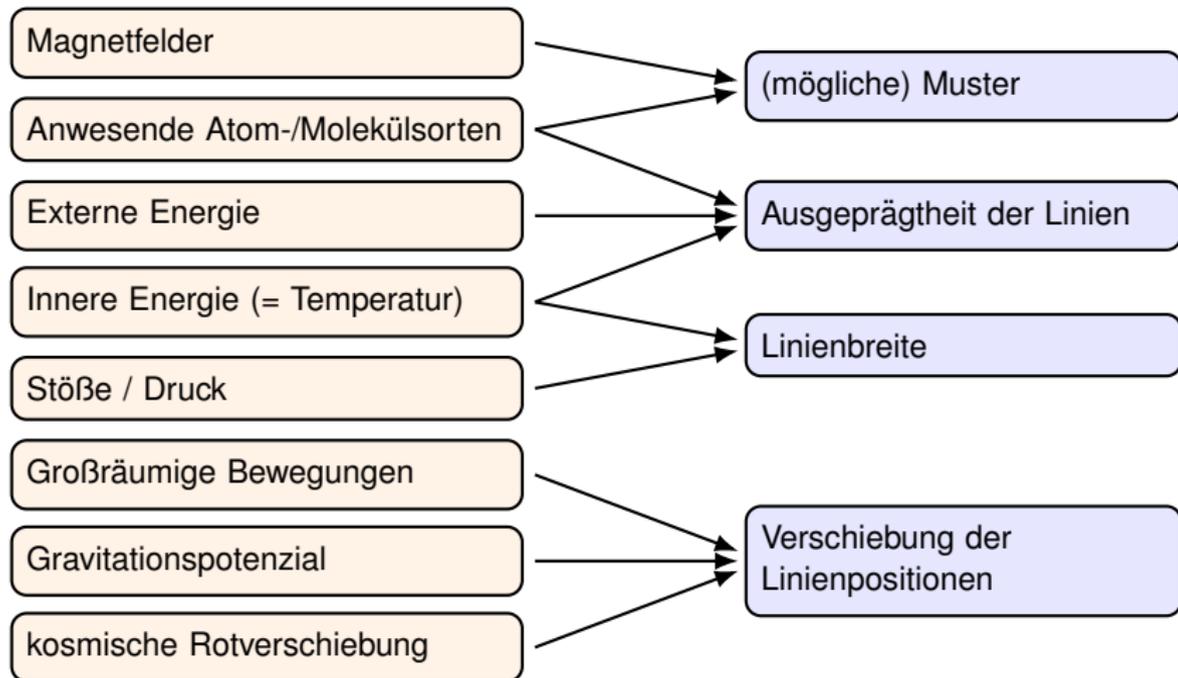


Sternentstehungsgebiet IC2944, Bild: ESO

Welche Eigenschaft hat eine Spektrallinie?



Was beeinflusst Spektrallinien-Eigenschaften?



Temperaturabhängigkeit

Spektrallinien treten bei **Übergängen** auf.

Voraussetzung: Energiereicherer Zustand ist überhaupt besetzt!

Im thermodynamischen Gleichgewicht: Temperatur T bestimmt ungeordnete Energie im System, Fluktuationen

Wahrscheinlichkeit, dass Zustand mit Energie E besetzt ist:

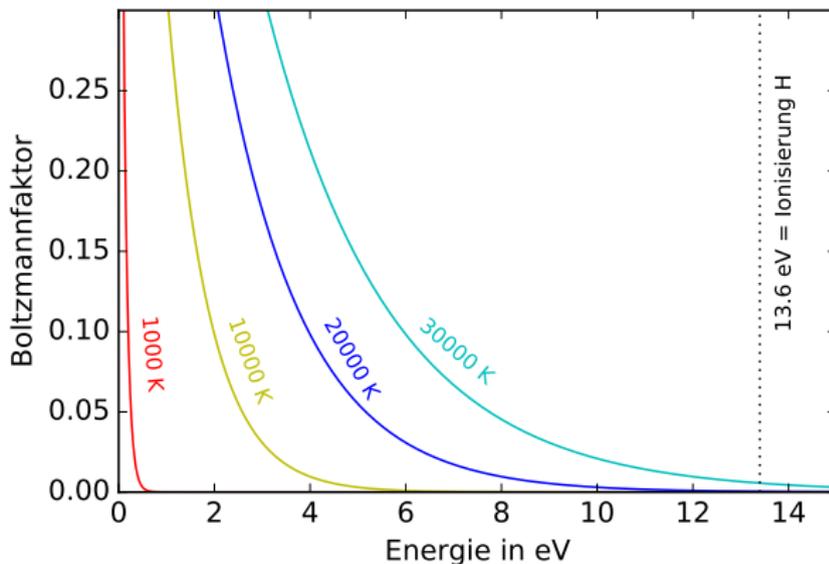
$$W(E) \sim \exp\left[-\frac{E}{k_B T}\right]$$

Boltzmannfaktor

Temperaturabhängigkeit

Boltzmannfaktor, $k_B = 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$:

$$W(E) \sim \exp\left[-\frac{E}{k_B T}\right]$$



Sternatmosphären und Temperatur

Anwendung auf Sternatmosphären: Fowler, Milne, Payne u.a. 1920er

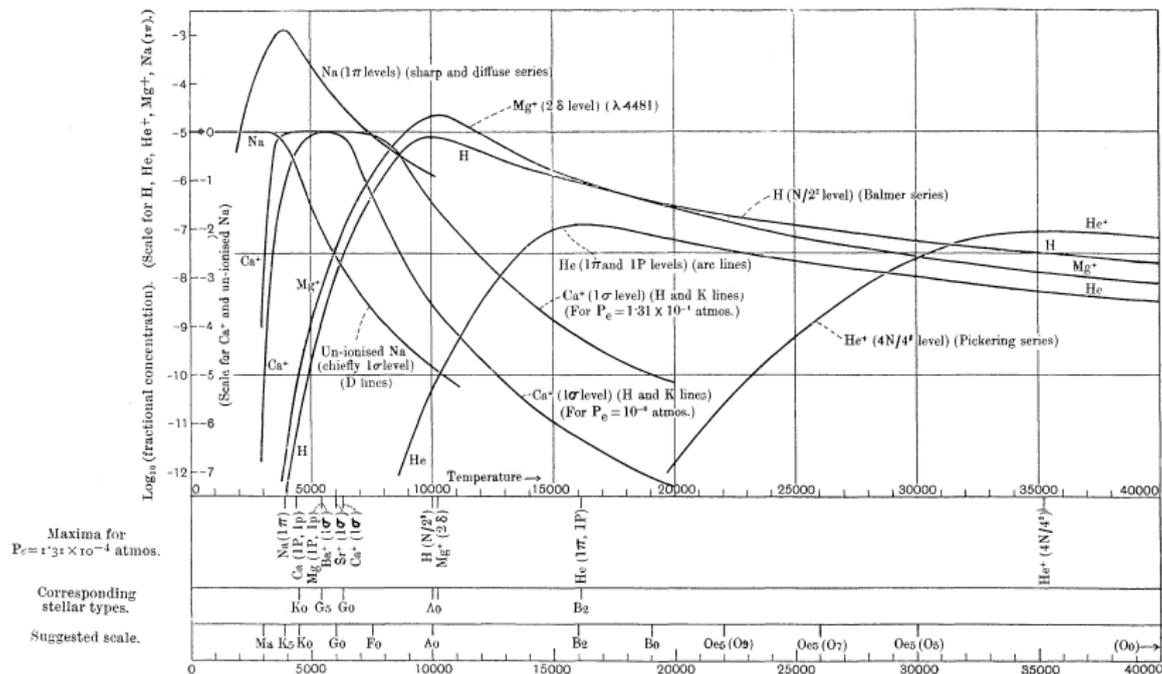


Bild: Fowler & Milne 1923

Temperaturabhängigkeit

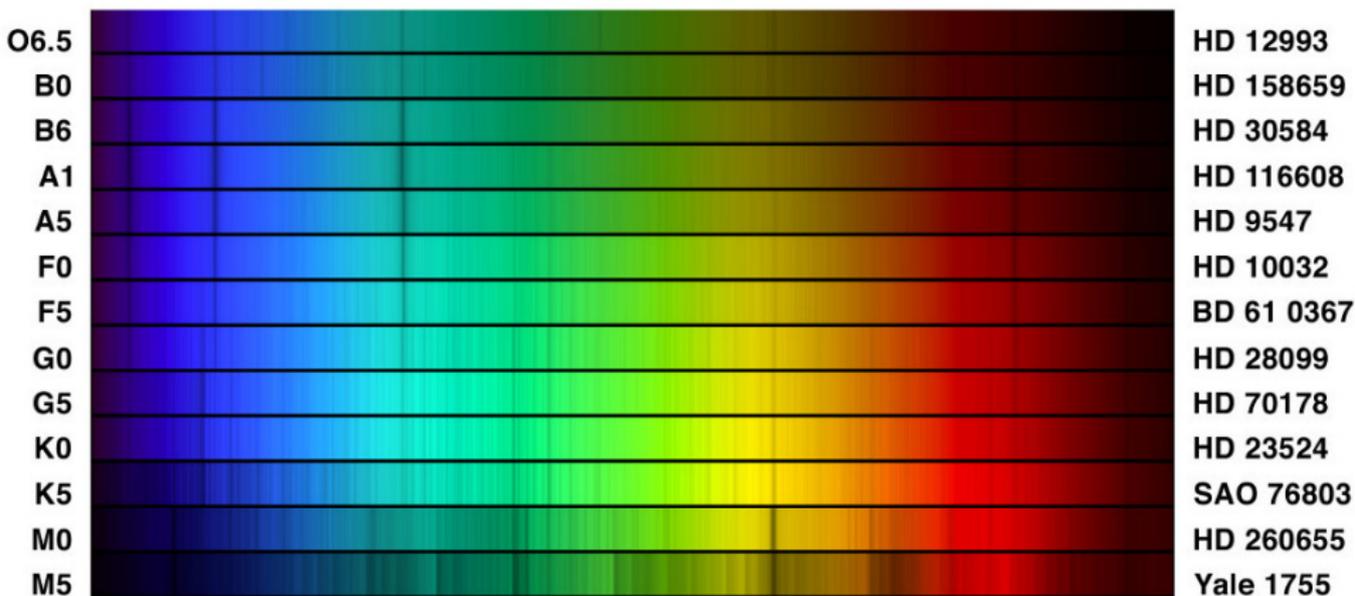
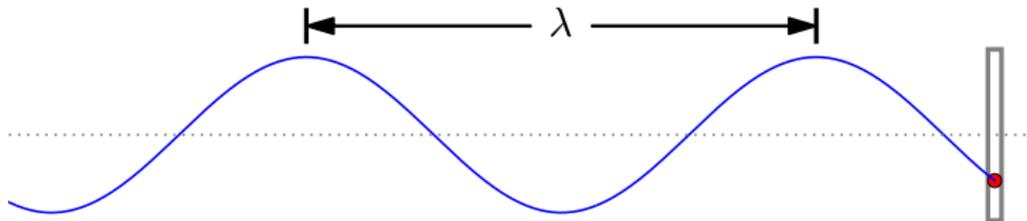


Bild: NOAO/AURA/NSF (permission for educational use)

Dopplereffekt: Wiederholung Welle



Dopplereffekt: Spektren

Dopplereffekt

Christian Doppler 1842 in „Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels“: Einfluss von Bewegung (direkt zum Beobachter hin/von ihm weg = Radialgeschwindigkeit) auf die Wellenlänge des beobachteten Lichts.

$$\lambda = (c \pm v)T = \lambda_0 \cdot (1 + v/c) \equiv \lambda_0 \cdot (1 + z)$$

$$z \equiv \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

hat in Abhängigkeit von der Radialgeschwindigkeit v (vom Beobachter weg gerichtet wenn $v > 0$) und der Lichtgeschwindigkeit c den Wert

$$z = \frac{v}{c}.$$

Dopplereffekt: Spektren

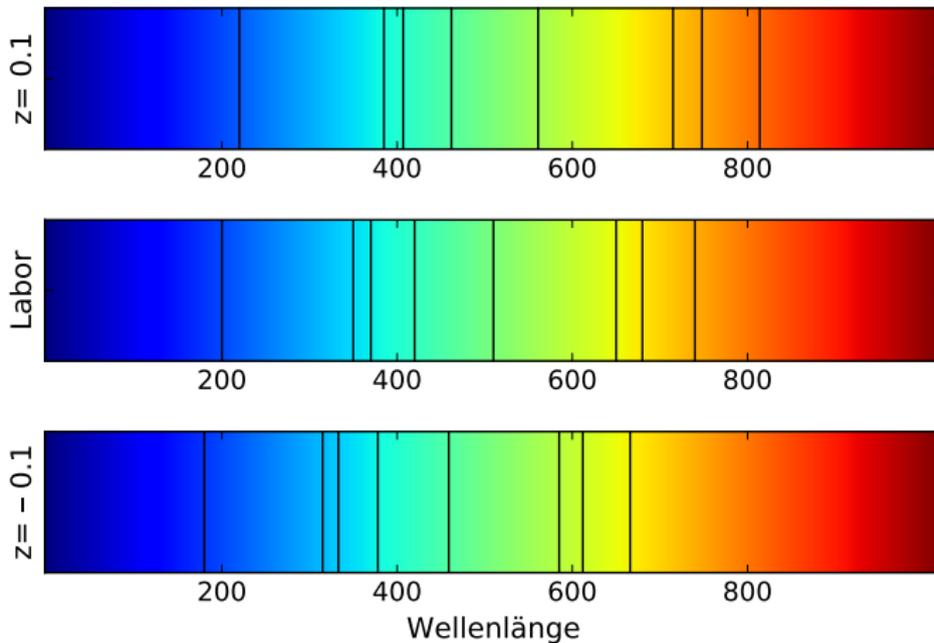
Linien werden um denselben Faktor verschoben:

$$\lambda = (1 + z) \cdot \lambda_0.$$

Positionen der Linien und Abstände zwischen den Linien verändern sich in gleicher Weise.

Dopplereffekt: Spektren

Spektrallinien helfen, Verschiebungen sichtbar zu machen:



Linienverbreiterung

Natürliche Linienbreite

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

Zeitskala Δt : Lebensdauer der angeregten Zustände

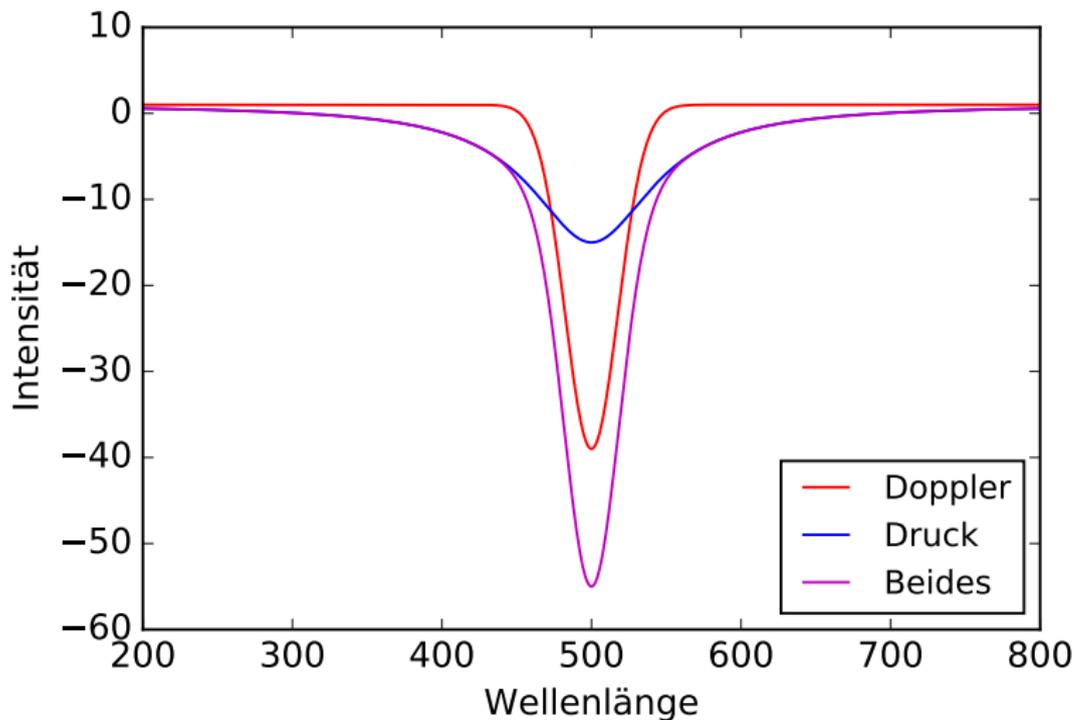
Stoßverbreiterung / Druckverbreiterung

Stöße verschieben zwischenzeitlich die Energieniveaus von Atomen/Molekülen

Dopplerverbreiterung

Atome/Moleküle bewegen sich ungeordnet durcheinander (thermische Bewegung), viele kleine Dopplereffekte überlagern sich.

Linienverbreiterung



Beispiel: Dopplereffekt

Periodische Sternbewegung verrät Exoplanet – hier: Proxima b

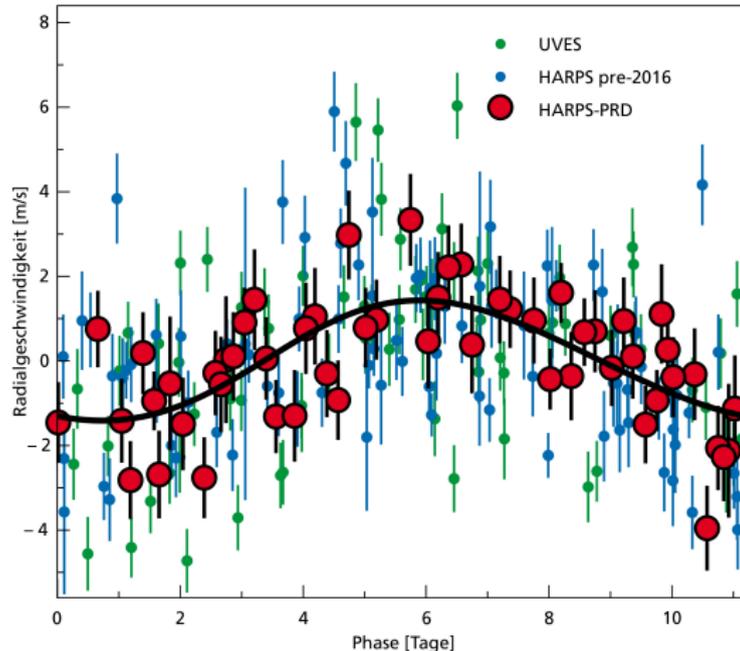
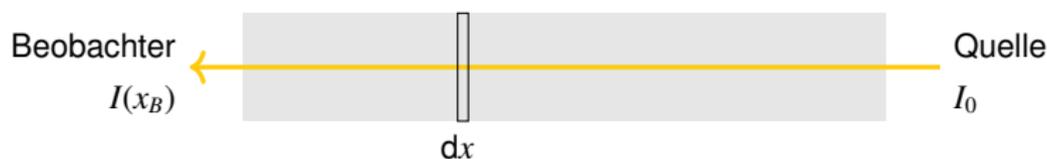


Bild: Guillem Anglada-Escudé et al., School of Physics and Astronomy, Queen Mary University of London, UK /
Max-Planck-Institut für Astronomie

Strahlungstransport und Modelle

Materie absorbiert, streut, emittiert: Modelle sind komplexer als nur eine Art von Quelle!

Einfachster Fall: Absorption

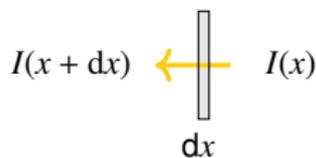


Wie fällt die Intensität mit der Schichtdicke ab?

Strahlungstransport und Modelle

Materie absorbiert, streut, emittiert: Modelle sind komplexer als nur eine Art von Quelle!

Einfachster Fall: Absorption



Wie fällt die Intensität mit der Schichtdicke ab? (Tafel)

Strahlungstransport: Modelle

Lösung:

$$I(x) = I_0 \cdot \exp[-\alpha x],$$

mit α dem Absorptionskoeffizienten.

Schicht der Dicke Δx : **Optische Dicke** definiert als

$$\tau \equiv \alpha \cdot \Delta x.$$

Optisch dünnes Medium: $\tau \ll 1$

Optisch dickes Medium: $\tau \gg 1$.

Konsequenzen für die Modellierung: Sehen wir das ganze Objekt?
(z.B. wichtig für: Massenschätzungen)

Beispiel: Roter Überriese

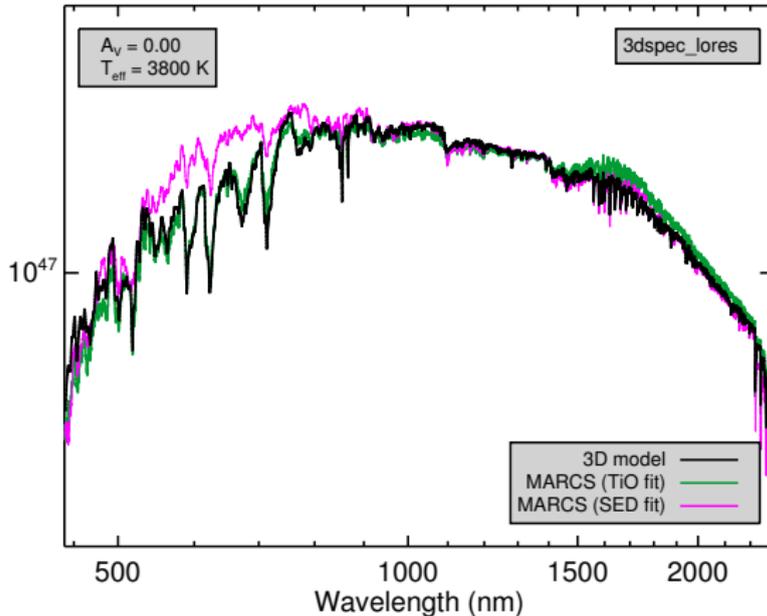


Bild: Davies et al. 2013 (via Bergemann, Kudritzki & Davies 2014)

Beispiel: Roter Überriese

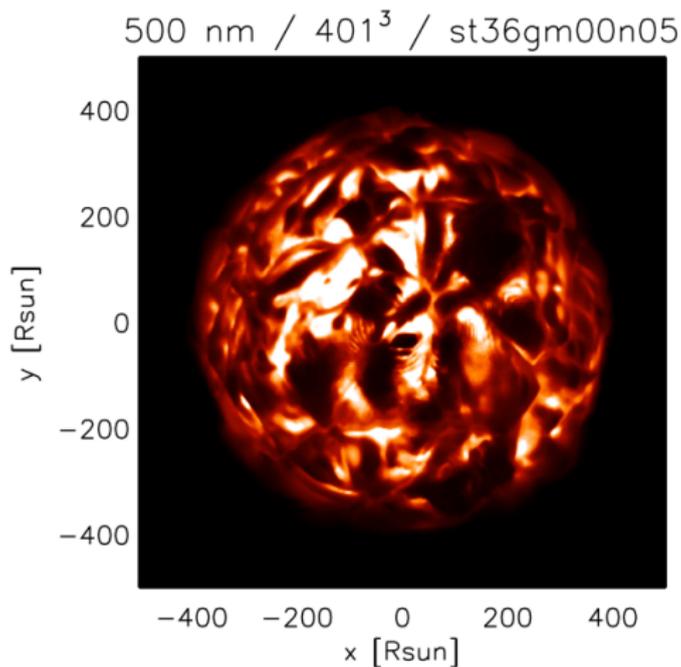


Bild: Chiavassa et al. 2011 (via Bergemann, Kudritzki & Davies 2014)

Beispiel: Aktiver Galaxienkern

Bild: C. Dullemond (ZAH, Universität Heidelberg) mit RADMC-3D

Fazit

Wir haben jetzt „Modellbausteine“ gesammelt, mit denen sich das Erscheinungsbild einfacher astronomischer Objekte erklären lässt: als Überlagerung von Wärmestrahlung (evt. unterschiedlicher Temperatur; Planck-Kurven) mit Spektrallinien (abhängig von chemischer Zusammensetzung, Temperatur, Druck / Dichte und mehr).

Um kompliziertere Modelle zu bauen, müssen außer der Erzeugung (Emission) von Licht auch die Absorption und Streuung von Licht berücksichtigt werden (Strahlungstransport).